

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-117125

(43)Date of publication of application : 27.04.2001

(51)Int.Cl.

G02F 1/35

(21)Application number : 11-293189

(71)Applicant : FUJITSU LTD

(22)Date of filing : 15.10.1999

(72)Inventor : WATANABE SHIGEKI

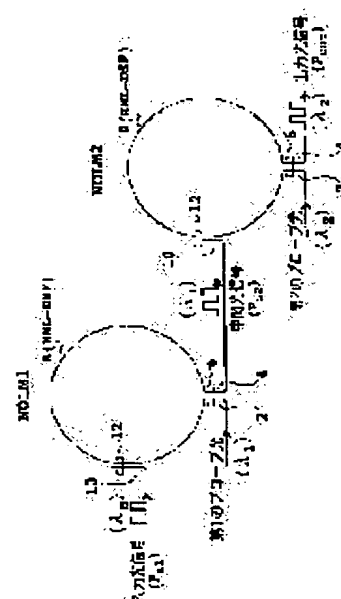
## (54) DEVICE AND SYSTEM FOR WAVE SHAPING

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a device and system for wave shaping and to provide a device having large freedom for wavelength conversion.

SOLUTION: The device includes at least two nonlinear loop mirrors (NOLM1, 2). Each of NOLM1, 2 includes a first optical coupler 6 having first and second optical paths 2, 4 which are directionally coupled, a loop optical path 8 consisting of a nonlinear optical medium which connects the first and second optical paths, and a second optical coupler 12 having a third optical path 10 which is directionally coupled to the loop optical path. The second optical path 4 of NOLM1 is optically connected to the third optical path 10 of NOLM2.

本発明による装置の第1実施形態を示す図



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 12.07.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 24.02.2004

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection] 2004-05905

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection] 25.03.2004

[Date of extinction of right]



①

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開 2001-117125

(P 2001-117125A)

(43)公開日 平成13年4月27日(2001.4.27)

(51)Int. Cl.<sup>7</sup>

G 0 2 F 1/35

識別記号

F I

G 0 2 F 1/35

テマコード(参考)

2K002

審査請求 未請求 請求項の数 2 3 O L

(全 1 8 頁)

(21)出願番号

特願平11-293189

(22)出願日

平成11年10月15日(1999.10.15)

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号

(72)発明者 渡辺 茂樹

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

(74)代理人 100075384

弁理士 松本 昂

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB12 AB40 CA03 CA13

CA15 DA10 DA11 HA27 HA31

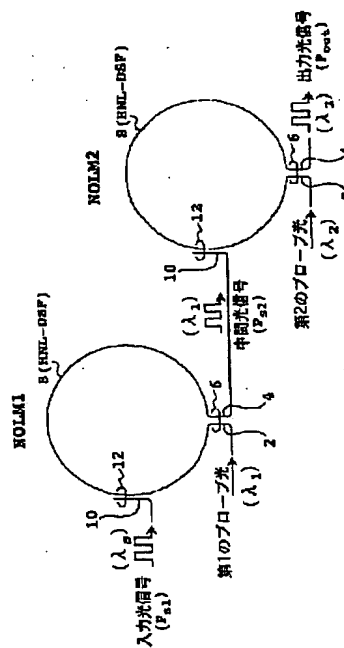
(54)【発明の名称】 波形整形のための装置及びシステム

(57)【要約】

【課題】 本発明は波形整形のための装置及びシステムに関し、波長変換の自由度が大きい装置を提供することが主な課題である。

【解決手段】 本発明による装置は少なくとも2つの非線形ループミラー(NOLM1, 2)を含む。NOLM1, 2の各々は、方向性結合される第1及び第2の光路2, 4を含む第1の光カプラ6と、第1及び第2の光路を接続する非線形光学媒質からなるループ光路8と、ループ光路に方向性結合される第3の光路10を含む第2の光カプラ12とを含む。NOLM1の第2の光路4はNOLM2の第3の光路10に光学的に接続される。

本発明による装置の第1実施形態を示す図



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1及び第2の非線形ループミラーを備えた装置であって、

上記第1及び第2の非線形ループミラーの各々は、方向性結合される第1及び第2の光路を含む第1の光カプラと、

上記第1及び第2の光路を接続する非線形光学媒質からなるループ光路と、

上記ループ光路に方向性結合される第3の光路を含む第2の光カプラとを備えており、

上記第1の非線形ループミラーの第2の光路は上記第2の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続されている装置。

【請求項2】 請求項1に記載の装置であって、

上記第1の非線形ループミラーの第1の光路には第1の波長を有する第1のプロープ光が供給され、

上記第1の非線形ループミラーの第3の光路には上記第1の波長と異なる第2の波長を有する入力光信号が供給され、

上記第1の波長を有し且つ上記光信号に同期した中間光信号が上記第1の非線形ループミラーの第2の光路から上記第2の非線形ループミラーの第3の光路に供給され、

上記第2の非線形ループミラーの第1の光路には上記第1の波長と異なる第3の波長を有する第2のプロープ光が供給され、

上記第3の波長を有し且つ上記中間光信号に同期した出力光信号が上記第2の非線形ループミラーの第2の光路から出力される装置。

【請求項3】 請求項2に記載の装置であって、

上記第1の波長と上記第2の波長の差の符号は上記第3の波長と上記第1の波長の差の符号に等しい装置。

【請求項4】 請求項2に記載の装置であって、

上記第3の波長は上記第2の波長に実質的に等しい装置。

【請求項5】 請求項2に記載の装置であって、

上記第1及び第2のプロープ光の少なくとも一方はクロックパルスである装置。

【請求項6】 請求項2に記載の装置であって、

上記各ループ光路は光ファイバによって提供される装置。

【請求項7】 請求項6に記載の装置であって、

上記光ファイバはGeO<sub>2</sub>がドープされたコアとフッ素がドープされたクラッドとを含む装置。

【請求項8】 請求項6に記載の装置であって、

上記第1の非線形ループミラーの光ファイバは上記第1の波長と上記第2の波長の実質的に中間の零分散波長を有しており、上記第2の非線形ループミラーの光ファイバは上記第1の波長と上記第3の波長の実質的に中間の零分散波長を有している装置。

【請求項9】 請求項6に記載の装置であって、

上記第1及び第2の波長は上記第1の非線形ループミラーの光ファイバの正常分散領域及び異常分散領域のいずれか一方にあり、

上記第1及び第3の波長は上記第2の非線形ループミラーの光ファイバの正常分散領域及び異常分散領域のいずれか一方にある装置。

【請求項10】 請求項6に記載の装置であって、

上記光ファイバは偏波保持ファイバである装置。

10 【請求項11】 請求項6に記載の装置であって、

上記光ファイバは実質的に同じ長さを有する第1及び第2の偏波保持ファイバからなり、

上記第1及び第2の偏波保持ファイバはこれらの主軸が互いに直交するように接続される装置。

【請求項12】 請求項6に記載の装置であって、

上記第1の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に接続され上記第1の波長を含む通過帯域を有する第1の光帯域通過フィルタと、

20 上記第2の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に接続され上記第3の波長を含む通過帯域を有する第2の光帯域通過フィルタとを更に備えた装置。

【請求項13】 請求項6に記載の装置であって、

上記第1の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に接続され上記第2の波長を含む阻止帯域を有する第1の光帯域阻止フィルタと、

上記第2の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に接続され上記第1の波長を含む阻止帯域を有する第2の光帯域阻止フィルタとを更に備えた装置。

【請求項14】 請求項6に記載の装置であって、

30 上記第1の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続され上記第2の波長を含む通過帯域を有する第1の光帯域通過フィルタと、

上記第2の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続され上記第1の波長を含む通過帯域を有する第2の光帯域通過フィルタとを更に備えた装置。

【請求項15】 請求項6に記載の装置であって、

上記第1の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続され上記第1の波長を含む阻止帯域を有する第1の光帯域阻止フィルタと、

40 上記第2の非線形ループミラーの第3の光路に接続され上記第3の波長を含む阻止帯域を有する第2の光帯域阻止フィルタとを更に備えた装置。

【請求項16】 上記第1の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に接続され上記中間光信号のパワーを検出する第1のパワーモニタと、

上記第1のパワーモニタにより検出されたパワーが大きくなるように上記入力光信号及び上記第1のプロープ光の少なくとも一方のパワーを制御する第1のパワーコン

トローラと、

50 上記第2の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に

接続され上記出力光信号のパワーを検出する第2のパワーモニタと、

上記第2のパワーモニタにより検出されたパワーが大きくなるように上記中間光信号及び上記第2のプロープ光の少なくとも一方のパワーを制御する第2のパワーコントローラとを更に備えた装置。

【請求項17】 請求項6に記載の装置であって、  
上記第1の非線形ループミラーの第1の光路に光学的に接続され上記第1のプロープ光と逆向きに出力される上記第1の波長を有する光のパワーを検出する第1のパワーモニタと、

上記第1のパワーモニタにより検出されたパワーが小さくなるように上記入力光信号及び上記第1のプロープ光の少なくとも一方のパワーを制御する第1のパワーコントローラと、

上記第2の非線形ループミラーの第1の光路に光学的に接続され上記第2のプロープ光と逆向きに出力される上記第3の波長を有する光のパワーを検出する第2のパワーモニタと、

上記第2のパワーモニタにより検出されたパワーが小さくなるように上記中間光信号及び上記第2のプロープ光の少なくとも一方のパワーを制御する第2のパワーコントローラとを更に備えた装置。

【請求項18】 請求項1に記載の装置であって、  
上記第2の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に接続された少なくとも1つの第3の非線形光学ミラーを更に備えた装置。

【請求項19】 カスケード接続されたN（Nは2より大きい整数）台の非線形ループミラーを備えた装置であって、

上記各非線形ループミラーは、  
方向性結合される第1及び第2の光路を含む第1の光カプラと、

上記第1及び第2の光路を接続する非線形光学媒質からなるループ光路と、

上記ループ光路に方向性結合される第3の光路を含む第2の光カプラとを備えており、

第i（ $i$ は $1 \leq i \leq (N-1)$ を満たす整数）番目の非線形ループミラーの第2の光路は第（ $i+1$ ）番目の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続されている装置。

【請求項20】 第1及び第2の非線形ループミラーを備えた波形整形装置であって、上記第1及び第2の非線形ループミラーの各々は、方向性結合される第1及び第2の光路を含む第1の光カプラと、上記第1及び第2の光路を接続する非線形光学媒質からなるループ光路と、上記ループ光路に方向性結合される第3の光路を含む第2の光カプラとを備えており、上記第1の非線形ループミラーの第2の光路は上記第2の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続されている波形整形装置と、

上記第1の非線形ループミラーの第1の光路に第1の波長を有する第1のプロープ光を供給する第1のプロープ光源と、

上記第1の非線形ループミラーの第3の光路に上記第1の波長と異なる第2の波長を有する入力光信号を供給する第1の光ファイバ伝送路と、

上記第2の非線形ループミラーの第1の光路に上記第1の波長と異なる第3の波長を有する第2のプロープ光を供給する第2のプロープ光源とを備え、

上記第1の波長を有し且つ上記光信号に同期した中間光信号が上記第1の非線形ループミラーの第2の光路から上記第2の非線形ループミラーの第3の光路に供給され、

上記第3の波長を有し且つ上記中間光信号に同期した出力光信号が上記第2の非線形ループミラーの第2の光路から出力されるシステム。

【請求項21】 請求項20に記載のシステムであって、

上記第2の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に接続され上記出力光信号を伝送する第2の光ファイバ伝送路を更に備えたシステム。

【請求項22】 入力信号光を第1及び第2の入力信号光に分岐する光分岐器と、

上記第1の入力信号光に基きクロックパルスが発生するクロック再生器と、

上記第2の入力信号光及び上記クロックパルスに基き波形整形を行なう波形整形装置であって、第1及び第2の非線形ループミラーを備え、上記第1及び第2の非線形ループミラーの各々は、方向性結合される第1及び第2の光路を含む第1の光カプラと、上記第1及び第2の光路を接続する非線形光学媒質からなるループ光路と、上記ループ光路に方向性結合される第3の光路を含む第2の光カプラとを備えており、上記第1の非線形ループミラーの第2の光路は上記第2の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続されている波形整形装置とを備え、

上記第2の入力信号光は上記第1の非線形ループミラーの第3の光路に供給され、

上記クロックパルスは上記第1の非線形ループミラーの第1の光路及び上記第2の非線形ループミラーの第1の光路の少なくともいずれか一方に供給される装置。

【請求項23】 請求項22に記載の装置であって、  
上記クロックパルスは上記第1の非線形ループミラーの第1の光路及び上記第2の非線形ループミラーの第1の光路のいずれか一方に供給され、

上記第1の非線形ループミラーの第1の光路及び上記第2の非線形ループミラーの第1の光路のいずれか他方にプロープ光を供給するプロープ光源を更に備えた装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波形整形のための装置及びシステムに関する。

#### 【0002】

【従来の技術】光レベルで波形整形を行う従来の波形整形装置として、マッハツェンダ干渉計(MZI)型光ゲートがある。この光ゲートは、位相シフトを与えるための第1及び第2の非線形光学媒質を含むマッハツェンダ干渉計を例えば光導波路基板上に集積化して構成される。連続波(CW)光としてのプローブ光が等分配されて第1及び第2の非線形光学媒質に供給される。このとき、等分配されたプローブ光の干渉により出力光が得られないように干渉計の光路長が設定されている。

【0003】第1及び第2の非線形光学媒質の一方には更に光信号が供給される。光信号及びプローブ光のパワーを適切に設定することによって、光信号に同期する変換光信号がこの光ゲートから出力される。変換光信号はプローブ光と同じ波長を有している。

【0004】第1及び第2の非線形光学媒質の各々として半導体光アンプ(SOA)を用いることが提案されている。例えば、波長1.5 $\mu$ m帯において、両端面を無反射化処理したInGaAs-SOAを各非線形光学媒質として用い、これらをInP/GaInAsP基板上に集積化したものが作製されている。

【0005】従来知られている他の波形整形装置として、非線形光ループミラー(NOLM)がある。NOLMは、方向性結合される第1及び第2の光路を含む第1の光カプラと、第1及び第2の光路を接続するループ光路と、ループ光路に方向性結合される第3の光路を含む第2の光カプラとを備えている。

【0006】ループ光路の一部または全体を非線形光学媒質から構成するとともに、第1及び第3の光路にそれぞれプローブ光及び光信号を供給することによって、変換光信号が第2の光路から出力される。

【0007】NOLMにおける非線形光学媒質としては光ファイバが一般的である。特に、非線形光学媒質としてSOAを用いたNOLMはSLALOM(Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror)と称される。

#### 【0008】

【発明が解決しようとする課題】上述した従来の波形整形装置においては、供給された光信号及びプローブ光に基づく非線形効果により変換光信号が発生する。しかし、発生した変換光信号の波長は供給されたプローブ光の波長と同じであることによって限定されるので、波形整形或いは光ゲートの機能を得る場合における波長変換の自由度が小さいという問題がある。

【0009】よって、本発明の目的は、波長変換の自由度が大きい波形整形のための装置を提供することである。本発明の他の目的は、そのような装置を備えた新規なシステムを提供することである。本発明の更に他の目的は以下の説明から明らかになる。

#### 【0010】

【課題を解決するための手段】本発明の第1の側面によると、第1及び第2の非線形ループミラーを備えた装置が提供される。第1及び第2の非線形ループミラーの各々は、方向性結合される第1及び第2の光路を含む第1の光カプラと、第1及び第2の光路を接続する非線形光学媒質からなるループ光路と、ループ光路に方向性結合される第3の光路を含む第2の光カプラとを備えている。第1の非線形ループミラーの第2の光路は第2の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続される。

【0011】この装置は例えば次のように動作する。第1の非線形ループミラーの第1の光路には第1の波長を有する第1のプローブ光が供給される。第1の非線形ループミラーの第3の光路には第1の波長と異なる第2の波長を有する入力光信号が供給される。第1の波長を有し且つ光信号に同期した中間光信号が第1の非線形ループミラーの第2の光路から第2の非線形ループミラーの第3の光路に供給される。第2の非線形ループミラーの第1の光路には第1の波長と異なる第3の波長を有する第2のプローブ光が供給される。その結果、第3の波長を有し且つ中間光信号(即ち光信号)に同期した出力光信号が第2の非線形ループミラーの第2の光路から出力される。

【0012】第1の波長と第2の波長の差の符号は第3の波長と第1の波長の差の符号に等しいことができる。この場合、第1の非線形ループミラーに供給される光信号と第2の非線形ループミラーから出力される出力光信号との間の波長差を大きくすることができる。

【0013】一方、第3の波長は第2の波長に実質的に等しいことができる。この場合、第1の非線形ループミラーに供給される光信号と第2の非線形ループミラーから出力される光信号との間の波長差が生じることなしにこれらの間の変換を行なうことができる。

【0014】このように、本発明によると、波長変換の自由度が大きい波形整形のための装置の提供が可能になる。また、後述する原理に従って、従来技術に比べてより効果的な波形整形が可能になるという付加的な効果も得られる。

【0015】第1及び第2のプローブ光の少なくとも一方はクロックパルスであることができる。この場合、クロックパルスに基づく光レベルでのリタイニングが可能になる。

【0016】本発明の第2の側面によると、カスケード接続されたN(Nは2より大きい整数)台の非線形ループミラーを備えた装置が提供される。各非線形ループミラーは、方向性結合される第1及び第2の光路を含む第1の光カプラと、第1及び第2の光路を接続する非線形光学媒質からなるループ光路と、ループ光路に方向性結合される第3の光路を含む第2の光カプラとを備えている。第i(iは $1 \leq i \leq (N-1)$ を満たす整数)番目

の非線形ループミラーの第2の光路は第 $(i+1)$ 番目の非線形ループミラーの第3の光路に光学的に接続される。

【0017】本発明の第3の側面によると、本発明の第1の側面による装置によって提供される波形整形装置と、第1及び第2のプローブ光源と、第1の光ファイバ伝送路とを備えたシステムが提供される。第1のプローブ光源は、第1の非線形ループミラーの第1の光路に第1の波長を有する第1のプローブ光を供給する。第1の光ファイバ伝送路は、第1の非線形ループミラーの第3の光路に第1の波長と異なる第2の波長を有する入力光信号を供給する。第2のプローブ光源は、第2の非線形ループミラーの第1の光路に第1の波長と異なる第3の波長を有する第2のプローブ光を供給する。

【0018】この構成によると、第1の光ファイバ伝送路の出力側に設けられた光受信機内で本発明に従う波形整形を実施することができる。

【0019】このシステムは、第2の非線形ループミラーの第2の光路に光学的に接続され、出力光信号を伝送する第2の光ファイバ伝送路をさらに備えることができる。この場合、第1の光ファイバ伝送路の出力端と第2の光ファイバ伝送路の入力端との間に設けられる光中継器内において本発明に従う波形整形を実施することができる。

【0020】本発明の第4の側面によると、入力信号光を第1及び第2の入力信号光に分岐する光分岐器と、第1の入力信号光に基きクロックパルスを発生するクロック再生器と、第2の入力信号光及びクロックパルスに基き波形整形を行なう波形整形装置とを備えた装置が提供される。波形整形装置としては本発明による装置を用いることができる。

【0021】

【発明の実施の形態】図1を参照すると、本発明に適用可能なNOLM（非線形光ループミラー）の構成が示されている。このNOLMは、方向性結合される第1及び第2の光路2及び4を含む第1の光カブラ6と、第1及び第2の光路2及び4を接続するループ光路8と、ループ光路8に方向性結合される第3の光路10を含む第2の光カブラ12とを備えている。

【0022】ループ光路8の一部または全部は非線形光学媒質NLによって提供されている。第1の光カブラ6のカップリング比は実質的に1:1に設定される。

【0023】このNOLMの動作を簡単に説明すると、波長 $\lambda_{probe}$ を有するプローブ光が光カブラ6の第1の光路2に入力され、波長 $\lambda_{sig}$ を有する光信号が光カブラ12の第3の光路10に入力されたときに、波長 $\lambda_{probe}$ を有する変換光信号が光カブラ6の第2の光路4から出力されるというものである。プローブ光は連続波（CW）光或いは光パルスであり得る。ここでは、プローブ光はCW光として図示されている。

【0024】プローブ光は、光カブラ6によりパワーが等しい2成分に分けられ、これら2成分は、ループ光路8をそれぞれ時計回り及び反時計回りに厳密に同一光路長で伝搬し、非線形光学媒質NLにより共に等しい位相シフト $\phi$ を受けた後、光カブラ6により合成される。光カブラ6における合成に際して、2成分のパワーは等しく位相も一致しているため、合成により得られた光はあたかもミラーにより反射されるがごとく第1の光路2から出力され、ポート4からは出力されない。

【0025】ループ光路8の途中から光カブラ12により光信号が入力されると、この光信号はループ光路8の一方（図では時計回り）にだけ伝搬し、この方向に伝搬する光に対しては、オンパルスが通るときだけ非線形光学媒質NLの非線形屈折率が変化する。従って、プローブ光の2成分が光カブラ6で合成されるに際して、光信号のオフパルスと同期した部分のプローブ光の2成分の位相は一致するが、光信号のオンパルスと同期した部分のプローブ光の2成分の位相は異なる。その位相差を $\Delta\phi$ とすると、光カブラ6の第2の光路4には $\{1 - \cos(\Delta\phi)\} / 2$ に比例する出力が得られる。

【0026】今、位相差が $\pi$ になるように入力光信号のパワーを設定すれば、オンパルスのときに合成された2成分が第2の光路4だけから出力されるようなスイッチ動作が可能になる。このようにして、波長 $\lambda_{sig}$ の光信号から波長 $\lambda_{probe}$ の変換光信号への変換が行なわれる。即ち、光信号のデータに関して波長変換が行なわれていることになる。

【0027】非線形光学効果として光カー効果（光信号とプローブ光による相互位相変調（XPM））を用いるとすると、位相シフト $\Delta\phi$ は $\gamma PL$ に比例する。ここに $\gamma$ は非線形光学媒質NLの非線形係数、Pは非線形光学媒質NL内における光パワー、Lは非線形光学媒質NLにおける光カー効果の相互作用長である。

【0028】図2は位相差 $\Delta\phi$ に対するNOLMの出力特性を示すグラフである。グラフの主要部分における縦軸はポート4から出力される変換光信号のパワー $P_{out}$ 、横軸は位相差 $\Delta\phi$ を示している。符号14で示されるコサインカーブにおいて、極小値を与える位相差 $\Delta\phi$ は0に相当し、極大値を与える $\Delta\phi$ は $\pi$ に相当している。従って、位相差 $\Delta\phi$ の0及び $\pi$ にそれぞれ入力光信号の“0”レベル（ $P_{space}$ ）及び“1”レベル（ $P_{mark}$ ）を対応させることにより入力光信号に付随する雑音の抑圧が可能である。これは、 $\{1 - \cos(\Delta\phi)\} / 2$ に従う変換においては、線形増幅変換の場合と異なりパルスの立ち上がり及びピーク付近での過飽和特性があるからである。

【0029】NOLMにおける非線形光学媒質NLとして最も一般的なのは光ファイバである。分散シフトファイバ（DSF）が主に用いられており、その長さは通常数kmである。一方、非線形光学媒質NLとしてSOA

(半導体光増幅器)を用いたものも提案されている(S LALOM)。

【0030】SOAタイプは小型集積化の点で優れている。しかし、SOAから付加される自然放出光(ASE)雑音の影響により変換の際に信号対雑音(S/N)比が低下したり、キャリア効果に起因する速度制限等の課題がある。

【0031】一方、ファイバタイプのNOLMでは、ファイバ内の三次非線形光学効果の応答時間がフェムト秒オーダーと非常に高速であるが、長いファイバを必要とするので、速度制限をなくすためには高精度の分散管理が必要になる。また、入力光信号の偏波状態に対する依存性やループ内での偏波変動に対する対策が難しいといった課題もある。

【0032】発明者は、特願平10-176316号(平成10年6月23日出願)において、高非線形分散シフトファイバ(HNL-DSFを用いたコンパクトなNOLMを提案した。本発明は主にこのNOLMを多段に縦列接続(カスケード接続)した構成による高性能な波形整形装置を提供し、これを用いて光2R等の光信号\*20

$$\gamma = \omega n_2 / c A_{\text{eff}}$$

で表される。ここに、 $\omega$ は光角周波数、 $c$ は真空中の光速を表し、 $n_2$ 及び $A_{\text{eff}}$ は光ファイバの非線形屈折率及び有効コア断面積をそれぞれ表す。

【0036】従来のDSFの非線形係数は $\gamma = 2.6 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 程度と小さいので、十分な変換効率を得るためには数km~10km以上の長さが必要である。より短尺のDSFで十分な変換効率を実現することができるとすれば、零分散波長を高精度に管理することが可能となり、高速・広帯域変換を実現することができる。

【0037】一般に、光ファイバの3次非線形効果を高めるためには、(1)式において非線形屈折率 $n_2$ を大きくし、あるいは有効コア断面積 $A_{\text{eff}}$ に対応するモードフィールド径(MFD)を小さくして光強度を高くするのが有効である。

【0038】非線形屈折率 $n_2$ を大きくするためには、例えば、クラッドにフッ素等をドープしあるいはコアに高濃度の $\text{GeO}_2$ をドープすればよい。コアに $\text{GeO}_2$ を25~30mol%ドープすることによって、非線形屈折率 $n_2$ として $5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 以上の大きな値が得られている(通常のシリカファイバでは約 $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ )。

【0039】一方、MFDを小さくすることは、コア及びクラッド間の比屈折率差 $\Delta$ あるいはコア形状の設計により可能である。このようなDSFの設計は分散補償ファイバ(DCF)の場合と同様である。例えば、コアに $\text{GeO}_2$ を25~30mol%ドープし、且つ、比屈折率差 $\Delta$ を2.5~3.0%に設定することによって、4 $\mu\text{m}$ よりも小さなMFDが得られている。そして、非線形屈折率 $n_2$ を大きくすることとMFDを小さくするこ

\*処理を実現せんとするものである。ここで、「2R」はリシェーピング(振幅再生)及びリジェネレーション(波形等化及び雑音抑圧等)の2つの機能を意味している。

【0033】光通信システムにおける光信号処理に適用可能な非線形光学効果としては、主に、2次非線形光学媒質中の三光波混合あるいは、3次非線形光学媒質中の自己位相変調(SPM)、相互位相変調(XPM)及び四光波混合(FWM)等の光カー効果が考えられる。2次非線形光学媒質としては、InGaAs及びLiNbO<sub>3</sub>等がある。3次非線形光学媒質としては、半導体光アンプ(SOA)及び発振状態にある分布帰還レーザーダイオード(DFB-LD)等の半導体媒質あるいは光ファイバが考えられる。

【0034】本発明では、特に光ファイバ内の光カー効果を用いることができる。光ファイバとしては単一モードファイバが適しており、特に波長分散が比較的小さい分散シフトファイバ(DSF)が望ましい。

【0035】一般に、光ファイバの3次非線形係数 $\gamma$ は、

$$\dots\dots (1)$$

ととの総合効果として、 $15 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 以上の大きな非線形係数 $\gamma$ を有する光ファイバ(HNL-DSF)が得られている。

【0040】他に重要な要素として、上述のように大きな非線形係数 $\gamma$ を有するHNL-DSFが、用いる波長帯で零分散を持つことである。この点に関しても各パラメータを以下のように設定することにより満足することができる。通常のDCFにおいては、一般にMFDを一定にした条件で比屈折率差 $\Delta$ を大きくすると、分散値は正常分散領域で大きくなる。一方、コア径を大きくすると分散は減少し、逆にコア径を小さくすると分散は大きくなる。従って、用いる波長帯においてMFDをある値に設定した状態で、コア径を大きくしていくと分散を0とすることが可能である。

【0041】長さLの光ファイバ中での光カー効果による位相シフトは、 $\gamma P_p L$ に比例する。ここに、 $P_p$ は平均ポンプ光パワーである。従って、非線形係数 $\gamma$ が $15 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ のファイバは通常のDSFに比べて $2.6 / 15 \div 1 / 5.7$ 程度の長さで同じ変換効率を達成可能である。上述のように通常のDSFでは10km程度の長さが必要であるが、このように大きな非線形係数 $\gamma$ を有するHNL-DSFにあっては、1~2km程度の長さで同様の効果が得られることになる。実用上は、ファイバが短くなる分損失も小さくなるので、同じ効率を得るために更にファイバを短くすることができる。このように短いファイバにおいては、零分散波長の制御性がよくなり、以下に説明するように極めて広帯域の変換が可能になる。更に、数kmのファイバ長であれば、定偏波化が可能になり偏波面保存能力が確保されているので、



HNL-DSFの本発明への適用は、高い変換効率及び広い変換帯域を達成し且つ偏波依存性を排除する上で極めて有効である。

【0042】光ファイバを用いて光カー効果、特にXPMを有効に発生させて、光信号から変換光信号への変換効率を高めるためには、プローブ光と光信号との間の位相整合をとる必要がある。図3によりこれを説明する。

【0043】図3はNOLMにおける位相整合の説明図である。ここでは、光路2に供給される波長 $\lambda_{probe}$ のプローブ光及び光路10に供給される波長 $\lambda_{sig}$ の光信号の各々が光パルスであると仮定する。プローブ光としての光パルスは、光カプラ6においてループ光路8を時計回りに伝搬する第1プローブパルスと反時計回りに伝搬する第2プローブパルスとに分岐される。また、光信号としての光パルスは、光カプラ12を通して信号パルスとしてループ光路8内に時計回りに導入される。

【0044】ループ光路8における位相整合条件は、ループ光路8内を共に時計回りに伝搬する信号パルス及び第1プローブパルスのタイミングの一致性により与えられる。もし、信号パルス及び第1プローブパルスのタイミングが一致しない場合には、XPMによる光カーシフトが制限され、有効なスイッチ動作あるいはゲート動作が困難になる。

【0045】信号パルス及び第1プローブパルスの波長は異なるので、ループ光路8における信号パルス及び第1プローブパルスの群速度は異なり、結果としてループ光路8の長さ按比例するタイミングずれが生じる（ウォークオフ）。これを回避するためには、信号パルス及び第1プローブパルスの群速度が一致するような波長配置を選択することが望ましい。

【0046】タイミングずれを最小限に抑えるための最も有効な波長配置は、信号パルスの波長及び第1プローブパルスの波長をループ光路8の零分散波長に対して実質的に対称に位置させることにより得られる。零分散波長に近い広い帯域に渡って、波長分散はほぼ直線的に変化しており、上述の波長配置により信号パルス及び第1プローブパルスの群速度を一致させて、良好な位相整合条件を得ることができる。

【0047】このように、本発明のある側面によると、ループ光路の零分散波長を $\lambda_0$ とするときに、 $\lambda_{sig} + \lambda_{probe} = 2\lambda_0$ とすることによって、位相整合条件を得ることができ、光信号から変換光信号への変換効率を高めることができる。

【0048】しかし、このような波長配置をとっても、零分散波長自体がファイバ長手方向に変動していると、群速度間にずれが生じ、これが変換帯域及び変換可能な信号速度に制限を与える。このように、ファイバによる変換帯域は分散により制限されることになる。長手方向の分散が完全に制御され、例えば全長（正確には非線形

長）に渡り唯一の零分散波長を有するファイバが作られたとすれば、プローブ光の波長と光信号の波長とをこの零分散波長に関して対称な位置に配置することにより事実上無限大の（分散の波長依存性が直線状である範囲で制限のない程広い）変換帯域が得られることになる。しかし、実際には、零分散波長が長手方向にばらつくため、位相整合条件が理想状態からずれ、これにより帯域が制限される。

【0049】広帯域化を実現するための第1の方法は、ループ光路8の一部又は全部としてHNL-DSFを用いることである。HNL-DSFを用いた場合には、1～2km程度の長さで十分な変換が可能になるので、分散の制御性がよくなり、広帯域特性を得やすい。その際、特に光カー効果の発生効率が高い入力端付近の零分散波長のばらつきを小さく抑えることができれば、最も効率よく帯域を拡大可能である。更に、ファイバを複数の小区間に分割し、零分散波長が似ている区間同士をスプライス等により繋ぎ合わせていく（当初のファイバ端から数えた順番とは違う順番で）ことにより、全長における平均分散は同じであるにも係わらず、広い変換帯域を得ることができる。

【0050】あるいは又、十分に広い変換帯域を得るのに必要な程度に高精度な分散制御が可能な長さ（例えば数100m以下）のファイバを予め多数用意しておき、所要の零分散波長のもを組み合わせることでスプライスして、所要の変換効率を得るのに必要な長さのファイバを作ることも可能である。

【0051】このようにして変換帯域を拡大する場合には、光強度の高い入力端（例えば非線形光学媒質の両端）付近に零分散波長のばらつきが少ない部分を集めるのが有効である。また、必要に応じて順次分割数を増やしたり、入力端から離れた位置で比較的分散の大きな部分では、分散の正負を交互に配置する等により小区間を適切に組み合わせることによって、更に変換帯域を拡大することができる。

【0052】光ファイバを分割するに際して各区間をどの程度短くすれば十分か否かの目安としては、例えば、非線形長を基準にすればよい。非線形長に比べて十分短いファイバ内での3次非線形効果においては、位相整合はそのファイバの平均分散値に依存すると考えることができる。一例として、非線形係数 $\gamma$ が $2.6 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ のファイバで30mW程度のポンプ光パワーを用いた3次非線形効果においては、非線形長は12.8km程度になるから、その1/10程度、即ち1km程度が1つの目安となる。他の例としては、非線形係数 $\gamma$ が $15 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ のファイバで30mW程度のポンプ光パワーを用いた3次非線形効果においては、非線形長は2.2km程度になるから、その1/10程度、即ち200mが1つの目安となろう。いずれにしても、非線形長に比べて十分短いファイバの平均零分散波長を測定し、ほぼ同

10

20

30

40

50

じ値のものを組み合わせて所要の変換効率のファイバを構成すれば、広い変換帯域を得ることができる。

【0053】このようなファイバによるFWMの帯域を拡大する方法に関する付加的な詳細については、特願平10-176316号を参照されたい。

【0054】尚、FWMの発生には、ファイバの零分散波長とポンプ光の波長とがほぼ一致するように設定するのが有効であるが、その際、ポンプ光、信号光あるいは変換光のパワーがファイバ内の誘導ブリュアン散乱(SBS)のしきい値を超えると、FWMの発生効率が低下する。SBSの影響を抑圧するためには、ポンプ光又は信号光について周波数変調又は位相変調を行なえばよい。その際の変調速度は数100kHz程度で十分であり、信号光の信号速度がGb/s以上の高速信号である場合には変調による影響は殆ど無い。

【0055】図1に示されたNOLMが動作するためには、プローブ光の偏波状態がループ光路8内で保持される必要がある。すなわち、光カブラ6で分離されたプローブ光は、ループ光路8内を各々時計回り及び反時計回り方向に伝搬した後、同じ偏波状態で光カブラ6に戻って来る必要がある。

【0056】HNLD SFを用いることによって、偏波状態を保持するのに十分短い長さでループ光路8を構成することができる。例えば、偏波コントローラを用いてループ光路8内における偏波状態を調節することができる。

【0057】尚、光信号の偏波状態は基本的にはプローブ光の偏波状態にほぼ一致させるのがよいが、ファイバ内の偏波分散等にも影響されることがあり、出力される光のパワーが最大になるように両者の偏波状態を最適化するのがよい。

【0058】図4は本発明による装置の第1実施形態を示す図である。この装置は、カスケード接続された第1の非線形ループミラー(NOLM1)及び第2の非線形ループミラー(NOLM2)を有している。NOLM1及びNOLM2の各々は、方向性結合される第1及び第2の光路2及び4を含む第1の光カブラ6と、第1及び第2の光路2及び4を接続するループ光路8と、ループ光路8に方向性結合される第3の光路10を含む第2の光カブラ12とを備えている。

【0059】第1の光カブラ6のカップリング比は実質的に1:1に設定される。ループ光路8の一部又は全部は非線形光学媒質によって提供される。より特定的には、この実施形態では、広い変換帯域を得ることのほか前述した付加的な効果を得るために、ループ光路8はHNLD SFによって提供されている。

【0060】NOLM1及びNOLM2をカスケード接続するために、NOLM1の第2の光路4はNOLM2の第3の光路10に光学的に接続される。

【0061】NOLM1の第1の光路2には、波長 $\lambda_1$

を有する第1のプローブ光が供給される。NOLM1の第3の光路10には波長 $\lambda_s$ ( $\neq \lambda_1$ )及びパワー $P_{s1}$ を有する入力光信号が供給される。その結果、NOLM1の第2の光路4からは、波長 $\lambda_1$ 及びパワー $P_{s2}$ を有し且つ入力光信号に同期した中間光信号が出力される。出力された中間光信号はNOLM2の第3の光路10に供給される。NOLM2の第1の光路2には、波長 $\lambda_2$ ( $\neq \lambda_1$ )を有する第2のプローブ光が供給される。その結果、NOLM2の第2の光路4からは、波長 $\lambda_2$ 及びパワー $P_{out}$ を有し且つ中間光信号に同期した出力光信号が出力される。

【0062】第1及び第2のプローブ光の各々は、CW光であっても良いし、或いは入力光信号のビットレートと同等の或いは異なる周波数で入力光信号と時間的に同期するクロックパルスであっても良い。

【0063】図4に示される実施形態は2つの非線形ループミラーを用いた2段構成であるが、この構成に順じて3段、4段、…、順次多段に複数の非線形ループミラーをカスケード接続してもよい。

【0064】この多段構成(2段構成を含む)の本発明による装置は少なくとも2つの特徴点を有する。

【0065】まず第1に、本発明による装置においては波長変換の自由度が大きくなる。例えば、図5の(A)に示されるように、波長 $\lambda_1$ と波長 $\lambda_s$ の差の符号を波長 $\lambda_2$ と $\lambda_1$ の差の符号に等しく設定することにより、1段構成による場合と比較して大きな波長変換を行なうことができる。また、図5の(B)に示されるように、波長 $\lambda_2$ を波長 $\lambda_s$ に実質的に等しく設定することによって、波長変換を伴うことなしに波形整形を行なうことができる。波長変換を伴わない波形整形は1段構成では不可能である。図示はしないが、波長 $\lambda_2$ は波長 $\lambda_1$ と $\lambda_s$ との間にあってもよい。この場合、波長 $\lambda_1$ と $\lambda_s$ を大きく異ならせることができるので、不要な光の除去等を容易に行なうことができる。ここでは、2段構成について説明したが、より多くの段数にすることによって、更に柔軟な波長変換が可能になる。

【0066】第2の特徴点は本発明による装置においては1段構成の場合と比較して波形整形機能が改善される点にある。前述したように、1段構成における入出力特性は $\{1 - \cos(\Delta\phi)\} / 2 = \sin^2(\Delta\phi / 2)$ であるから、 $n$ ( $n$ は自然数)段構成の規格化入出力関数(特性関数) $f_n(x)$ は以下のように表すことができる。

【0067】

$$f_n(x) = \sin^2 \{ \pi f_{(n-1)}(x) / 2 \}$$

$$f_0(x) = x$$

図6はこの関数をプロットしたものである。段数が大きくなるに従ってデジタル動作( $n \rightarrow \infty$ の場合に相当)に近づいていることがわかる。 $n=2$ の場合には、 $n=1$ の場合に比べてよりデジタル動作に近づいており、より

優れた波形整形特性が期待できる。従って、本発明によると、従来の1段構成のNOLMでは得られなかった優れた波形整形及び雑音抑圧が可能になる。

【0068】図4に示される実施形態では、NOLM1及びNOLM2のループ光路8としてHNL-DSFが用いられている。HNL-DSFの分散はビットレートやパルス形状等により適宜最適化することができる。例えば、短パルスを用いた高ビットレート信号の場合であれば、2つのパルスのウォークオフ（図3による説明を参照）が発生しないように設定するのが望ましい。一例としては、HNL-DSFの零分散波長を信号光波長（入力光信号の波長 $\lambda_s$ 又は中間光信号の波長 $\lambda_i$ ）とプローブ光波長（第1のプローブ光の波長 $\lambda_1$ 又は第2のプローブ光の波長 $\lambda_2$ ）の中間付近に配置することが考えられる。この場合、NOLM1及びNOLM2の各々において2つのパルスはほぼ同じ群速度になるので、ウォークオフを最小にすることができる。ここで、信号光波長とプローブ光波長のどちらを正常分散領域に配置し他方を異常分散領域に配置するかについては、特性を見た上で適宜最適化することができる。

【0069】このように、本発明のある側面によると、NOLM1のループ光路8を提供するHNL-DSFは、波長 $\lambda_1$ と波長 $\lambda_s$ の実質的に中間の零分散波長を有しており、NOLM2のループ光路8を提供するHNL-DSFは、波長 $\lambda_1$ と波長 $\lambda_2$ の実質的に中間の零分散波長を有している。これによりウォークオフの発生を防止して、短パルスを用いた高ビット信号の波形整形が可能になる。

【0070】或いはまた、零分散波長を2つのパルスよりも長波長側或いは短波長側に設定しても良い。この場合、ウォークオフを最小にすることはできないが、次のような利点が得られる。まず、長波長側に設定する場合には、信号光波長及びプローブ光波長は共に正常分散領域にあることになり、変調不安定効果を抑圧することができる。また、短波長側に設定する場合には信号光波長及びプローブ光波長は異常分散領域にあることになり、パルス圧縮効果を用いることができる。どのような配置に設定するかは実際のシステムの条件に応じて決定することができる。

【0071】このように、本発明のある側面によると、波長 $\lambda_1$ 及び $\lambda_s$ はNOLM1のループ光路8を提供するHNL-DSFの正常分散領域及び異常分散領域のいずれか一方にあり、波長 $\lambda_1$ 及び $\lambda_2$ はNOLM2のループ光路8を提供するHNL-DSFの正常分散領域及び異常分散領域のいずれか一方にある。これにより、変調不安定効果を抑圧することができ、或いはパルス圧縮効果を用いることができるようになる。

【0072】図4に示される実施形態では、各ループ光路8をHNL-DSFから構成している。HNL-DSFにあっては、従来のDSFに比べて3次非線形係数を

5～10倍に大きくすることが可能であるため、位相差 $\Delta\phi$ を $\pi$ とするために必要な光パワーと長さの積を $1/5 \sim 1/10$ にすることが可能である。従って、同じ信号パワーに対する所要長も $1/5 \sim 1/10$ で足り、その結果1kmあるいはそれ以下の長さで十分な特性を得ることができる。その結果、波長分散による信号速度制限が少なくしかも入力光信号の偏波状態に対する依存性を排除することができ、ループ光路8内における偏波変動に対する対策が不要なNOLMの提供が可能になる。

【0073】このように、本発明のある側面によると、各ループ光路8は非線形光学媒質としての光ファイバによって提供される。その光ファイバは、例えば、その光ファイバが偏波面保存能力を有する程度にその光ファイバの長さを短くするのに十分大きな非線形係数を有している。それにより、入力光信号の偏波状態に対する依存性を小さくすることができる。同じ目的のために、ループ光路8を提供する光ファイバとして偏波保持ファイバを用いても良い。

【0074】図7は本発明による装置の第2実施形態を示す図である。ここでは、NOLM1及びNOLM2の各々のループ光路8は、各々位相シフト $\Delta\phi/2$ を与える半部分8-1及び8-2からなる。半部分8-1及び8-2の各々は、偏波保持ファイバ（PMF）型に構成されるHNL-DSFからなる。

【0075】半部分8-1及び8-2の両方により与えられる位相シフトは $\Delta\phi$ となるので、図4の実施形態と同じようにして波形整形が可能である。

【0076】特にこの実施形態では、ループ光路8の中点近傍即ち半部分8-1及び8-2の接続点に偏波状態を直交させるための $\lambda/2$ 板機能24を付加している。この $\lambda/2$ 板機能24は、例えば、半部分8-1及び8-2の主軸が互いに直交するようにこれらをスプライス接続することにより得られる。

【0077】これにより、変換効率が入力光信号の偏波状態に依存しなくなり、しかも、 $\lambda/2$ 板機能24が付加されているので、各偏波保持ファイバの2偏波モード間の群速度の違いに起因する偏波分散を抑圧することができる。

【0078】具体的には、光カプラ6を介してループ光路8に導入される各プローブ光の偏波面を各偏波保持ファイバの主軸に対して $45^\circ$ 傾斜させておくことによって、NOLM1の光カプラ12からループ光路8に導入される光信号の偏波状態に依存しない変換効率を得ることができる。

【0079】尚、変換効率は、NOLM1の光カプラ12を介してループ光路8に導入される入力光信号のパワーとNOLM2の光カプラ6を介してループ光路8から取り出される出力光信号のパワーとの比により定義される。

【0080】図8は本発明による装置の第3実施形態を

10

20

30

40

50

示す図である。NOLM1の動作は、光カー効果、特にXPMにおける位相シフトの大きさに依存するため、そのループ光路8に導入される入力光信号及び第1のプロープ光のパワーを調節し得るようにしておくことが望ましい。そこで、この実施形態では、第1のプロープ光のパワー $P_1$ を調節するためにパワーコントローラ18を設け、入力光信号のパワー $P_{s1}$ を調節するためにパワーコントローラ20を設けている。パワーコントローラ18及び20の各々としては、可変光アッテネータ若しくは可変利得光アンプ又はこれらの組み合わせを用いることができる。

【0081】パワーコントローラ18及び20は制御回路22により自動制御される。制御回路22は、例えば、光カブラ24により第2の光路4から抽出された中間光信号の一部を受けるパワーモニタ26の出力信号に基づき、パワーモニタ26により検出された中間光信号のパワーが大きくなるようにパワーコントローラ18及び20の少なくともいずれか一方を制御する。その代わりに、制御回路22は、例えば、光カブラ28により第1の光路2から第1のプロープ光と逆向きに出力される光の一部を受けるパワーモニタ30の出力信号に基づき、パワーモニタ30により検出されたパワーが小さくなるようにパワーコントローラ18及び20の少なくともいずれか一方を制御するようにしても良い。第1のプロープ光と逆向きに出力される光は第1のプロープ光と同じ波長 $\lambda_1$ を有している。

【0082】このような制御により、NOLM1のループ光路8において適切な位相差が生じるように入力光信号及び第1のプロープ光の少なくともいずれか一方のパワーを制御することができるので、自動的に高い変換効率を維持することができる。

【0083】一方、NOLM2の動作も、光カー効果、特にXPMにおける位相シフトの大きさに依存するため、そのループ光路8に導入される中間光信号及び第2のプロープ光のパワーを調節し得るようにしておくことが望ましい。そこで、この実施形態では、第2のプロープ光のパワー $P_2$ を調節するためにパワーコントローラ32を設け、中間光信号のパワー $P_{s2}$ を調節するためにパワーコントローラ34を設けている。パワーコントローラ32及び34の各々としては、可変光アッテネータ若しくは可変利得光アンプ又はこれらの組み合わせを用いることができる。

【0084】パワーコントローラ32及び34は制御回路22により自動制御される。制御回路22は、例えば、光カブラ36により第2の光路4から抽出された出力光信号の一部を受けるパワーモニタ38の出力信号に基づき、パワーコントローラ38により検出された出力光信号のパワーが大きくなるようにパワーコントローラ32及び34の少なくともいずれか一方を制御する。その代わりに、制御回路22は、例えば、光カブラ40によ

り第1の光路2から第2のプロープ光と逆向きに出力される光の一部を受けるパワーモニタ42の出力信号に基づき、パワーモニタ42により検出されたパワーが小さくなるようにパワーコントローラ32及び34の少なくともいずれか一方を制御するようにしても良い。第2のプロープ光と逆向きに出力される光は第2のプロープ光と同じ波長 $\lambda_2$ を有している。

【0085】このような制御により、NOLM2のループ光路8において適切な位相差が生じるように中間光信号及び第2のプロープ光の少なくともいずれか一方のパワーを制御することができるので、自動的に高い変換効率を維持することができる。

【0086】NOLM1において、第1のプロープ光、入力光信号、或いは中間光信号の帯域外の雑音光を抑圧するために、光フィルタ44、46及び48が用いられている。光フィルタ44は、光カブラ6からループ光路8に導入される第1のプロープ光に作用させるためにパワーコントローラ18と第1の光路2との間に設けられている。光フィルタ44としては、第1のプロープ光の波長 $\lambda_1$ を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタ(BPF)を用いることができる。

【0087】光フィルタ46は、光カブラ12を介してループ光路8に導入される入力光信号に作用させるために、パワーコントローラ20と第3の光路10との間に設けられている。光フィルタ46としては、入力光信号の波長 $\lambda_s$ を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタあるいは第1のプロープ光の波長 $\lambda_1$ を含む阻止帯域を有する光帯域阻止フィルタ(BSF)を用いることができる。

【0088】このように、光帯域阻止フィルタを用いた場合にもSNRが改善されるのは、波形整形されるべき入力光信号は一般に伝送によりASE雑音を伴っており、中間光信号の波長 $\lambda_1$ の近傍で予めASE雑音の成分を除去しておくことによって、中間光信号のSNRが改善されるからである。

【0089】光フィルタ48は、NOLM1のループ光路8から光カブラ6を介して出力される中間光信号に作用させるために、第2の光路4に接続されている。光フィルタ48としては中間光信号の波長 $\lambda_1$ を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタ或いは入力光信号の波長 $\lambda_s$ を含む阻止帯域を有する光帯域阻止フィルタを用いることができる。

【0090】尚、各フィルタの通過帯域或いは阻止帯域の中心波長は、第1のプロープ光の中心波長或いは入力光信号の中心波長に一致する。各フィルタの通過帯域又は阻止帯域の幅は、入力光信号の帯域にほぼ等しいかそれよりも僅かに広い。各フィルタとしては誘電体多層膜フィルタ、ファイバグレーティングフィルタ等を用いることができる。

【0091】NOLM2において、第2のプロープ光、

中間光信号、或いは出力光信号の帯域外の雑音光を抑圧するために、光フィルタ50、52及び54が用いられている。光フィルタ50は、第1の光路2からループ光路8に導入される第2のプロープ光に作用させるために、パワーコントローラ32と第1の光路2との間に設けられている。光フィルタ50としては、第2のプロープ光の波長 $\lambda_2$ を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタを用いることができる。

【0092】光フィルタ52は、光カブラ12を介してループ光路8に導入される中間光信号に作用させるために、パワーコントローラ34と第3の光路10との間に設けられている。光フィルタ52としては、第2のプロープ光の波長 $\lambda_2$ を含む阻止帯域を有する光帯域阻止フィルタを用いることができる。

【0093】光フィルタ54は、ループ光路8から光カブラ6を介して出力される出力光信号に作用させるために、光路4に接続されている。光フィルタ54としては、出力光信号の波長 $\lambda_2$ を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタ或いは中間光信号の波長 $\lambda_1$ を含む阻止帯域を有する光帯域阻止フィルタを用いることができる。

【0094】尚、各フィルタの通過帯域或いは阻止帯域の中心波長は、第2のプロープ光の中心波長或いは中間光信号の中心波長に一致する。各フィルタの通過帯域又は阻止帯域の幅は、入力光信号又は中間光信号の帯域にほぼ等しいかそれよりも僅かに広い。各フィルタとしては、誘電体多層膜フィルタ、ファイバグレーティングフィルタ等を用いることができる。

【0095】図9は本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図である。このシステムは、波形整形装置56を有している。波形整形装置56は本発明による装置の種々の実施形態により提供され得る。波形整形装置56は、第1のプロープ光のための入力ポート56A（NOLM1の第1の光路2に対応）と、第2のプロープ光のための入力ポート56B（NOLM2の第1の光路2に対応）と、入力光信号のための入力ポート56C（NOLM1の第3の光路10に対応）と、出力光信号のための出力ポート56D（NOLM2の第2の光路4に対応）とを有している。

【0096】入力ポート56Aには第1のプロープ光源58が接続されており、光源58から出力された第1のプロープ光（波長 $\lambda_1$ ）は波形整形装置56に供給される。入力ポート56Bには第2のプロープ光源60が接続されており、光源60から出力された第2のプロープ光（波長 $\lambda_2$ ）は波形整形装置56に供給される。

【0097】入力ポート56Cには第1の光ファイバ伝送路62が接続されており、光ファイバ伝送路62により伝送された入力光信号（波長 $\lambda_s$ ）は波形整形装置56に供給される。出力ポート56Dには第2の光ファイバ伝送路64が接続されており、光ファイバ伝送路64

は波形整形装置56から出力された出力光信号（波長 $\lambda_2$ ）を伝送する。

【0098】光ファイバ伝送路62の入力端には、入力光信号を光ファイバ伝送路62に供給する光送信機（TX）66が接続されており、光ファイバ伝送路64の出力端には、光ファイバ伝送路64により伝送された出力光信号を受ける光受信機（RX）68が接続されている。

【0099】光送信機66における光信号の変調方法としては、例えば光振幅（強度）変調が採用される。この場合、光受信機68では、例えば直接検波を行うことができる。

【0100】光ファイバ伝送路62及び64の各々としては、単一モードのシリカファイバ、1.3 $\mu\text{m}$ 零分散ファイバ、1.55 $\mu\text{m}$ 分散シフトファイバ等を用いることができる。

【0101】波形整形装置56においてNOLM1及びNOLM2の各々の非線形光学媒質として用いられるHNLD SFを単一モード型に構成し、そのモードフィールド径を光ファイバ伝送路62及び64の各々のモードフィールド径よりも小さくすることによって、HNLD SFの長さを短くするのに十分大きな非線形係数を得ることができる。

【0102】このシステムによると、波形整形装置56において本発明に従った波形整形の動作が可能になると共に、その動作により、波長変換を伴って或いは波長変換を伴わずに得られた出力光信号を第2の光ファイバ伝送路64により伝送することができる。

【0103】図示はしないが、光ファイバ伝送路62及び64を含む光路上に単一又は複数の光増幅器が設けられていても良い。各光増幅器としてエルビウムドープファイバ増幅器（EDFA）が用いられている場合、各光増幅器ではASE雑音が発生しこれが累積するので、図9に示されるシステムでは、前述した波形整形装置56における波形整形或いは雑音抑圧の原理に従って、SNRが改善される。

【0104】この実施形態では、波形整形装置56を光ファイバ伝送路62及び64の間に設けて中継器として用いているが、光受信機68の内部或いはその近傍に本発明による装置を設けることによって、受信感度を改善することができる。

【0105】図示はしないが、図9に示されるシステムは、光ファイバ伝送路62及び64の少なくともいずれか一方の分散を補償するための分散補償器を更に備えていても良い。分散補償器は、例えば、各光ファイバ伝送路の分散と逆符号の分散を与える。分散補償器の分散の絶対値は、例えば、光受信機68における受信状態が最適になるように調節される。分散補償器を用いることによって、光ファイバ伝送路で生じる波長分散を抑圧することができるので、長距離の伝送が可能になる。

【0106】本発明による装置の実施形態においては、各プローブ光はCW光或いは光パルスであり得る。例えば、第1のプローブ光としてCW光を用い、第2のプローブ光として入力光信号に同期した光パルスとすることができる。この光パルスが入力光信号の基準周波数で発振するクロックパルスである場合、出力光信号はその基準周波数でリタイミングされたものになる。即ち、波形整形の機能と共にこのリタイミング機能を用いることにより、光レベルでの3R処理が可能になる。ここで、「3R」は前述した2R及びリタイミングの意味である。尚、第1のプローブ光を光パルスとするとともに第2のプローブ光をCW光としても良いし、或いは、第1及び第2のプローブ光の両方を光パルスにしても良い。

【0107】図10は本発明による装置の第4実施形態を示すブロック図である。この装置は、光分岐器70、クロック再生器72、タイミング調節器73、波形整形装置74及びプローブ光源76を備えている。光分岐器70には、ファイバ伝送に際しての分散や非線形光学効果により波形が歪んだ信号光、光アンプによる中継伝送に際しての光アンプのASE雑音の累積により波形が乱れた信号光、或いは偏波分散等によりジッターが累積した信号光が供給される。光分岐器70はその入力信号光を第1及び第2の信号光に分岐する。第1及び第2の信号光はそれぞれクロック再生器72及び波形整形装置74に供給される。クロック再生器72は供給された第1の入力信号光に基きクロックパルスを発生する。ここでは、信号光の波長及び速度（ビットレート）はそれぞれ $\lambda_s$ 及び $f_s$ であり、クロックパルスの波長及び周波数はそれぞれ $\lambda_c$ 及び $f_c$ である。発生したクロックパルスはタイミング調節器73でタイミングを調節されて波形整形装置74に供給される。

【0108】波形整形装置74は、プローブ光源76からのプローブ光を受ける入力ポート74Aと、クロック再生器72からのクロックパルスを受ける入力ポート74Bと、光分岐器70からの第2の信号光を受ける入力ポート74Cと、出力ポート74Dを有している。波形整形装置74は、供給された第2の入力信号光及びクロックパルスに基き波形整形を行い、再生信号光を出力ポート74Dから出力する。再生信号光の波長及び速度はそれぞれ $\lambda_c$ 及び $f_c$ である。

【0109】この実施形態では、ポート74AはNOLM1の第1の光路2に対応し、ポート74BはNOLM2の第1の光路2に対応し、ポート74CはNOLM1の第3の光路10に対応し、ポート74DはNOLM2の第2の光路4に対応している。従って、プローブ光源76から供給されるプローブ光は第1のプローブ光として用いられ、クロックパルスが第2のプローブ光として用いられている。その結果として、再生信号光の波長がクロックパルスの波長に等しくなっているのである。

【0110】或いは又、クロックパルスをポート74A

に入力し、プローブ光源76からのプローブ光をポート74Bに入力するようにしても良い。この場合、再生信号光の波長はプローブ光源76から供給されるプローブ光の波長に等しくなる。

【0111】或いは又、プローブ光源76を用いずに、クロックパルスを第1及び第2のクロックパルスに分岐し、第1及び第2のクロックパルスの一方を波長変換した後に両方をそれぞれポート74A及び74Bに入力しても良い。

【0112】このように、本実施形態によると、再生されたクロックパルスを用いて波形整形を行っているの、タイミングも含めて光レベルでの信号再生が可能になる。従って、この実施形態によると、本発明を適用することにより全光3R信号再生装置の提供が可能になる。

【0113】図10に示される実施形態においては波形整形装置74は、速度 $f_s$ の信号と周波数 $f_s$ のクロックパルスとのAND回路として機能している。クロックパルスの周波数を信号速度の分周倍（例えば信号速度が40Gb/sである場合10GHz）に設定することによって、OTDM（光時分割多重）信号のデマルチプレクシング等の動作を行うことができる。

【0114】クロック再生器72としては、信号光に含まれる周波数成分を感知し（引き込み）、ここから基準周波数のクロックパルスを発生させるモードロックレーザを用いることができる。或いは、波長 $\lambda_s$ 、速度 $f_s$ の信号光を波長 $\lambda_c$ で連続発振しているレーザに入力し、このレーザ内の光変調器を信号光でAM変調又はFM変調する。そして、この変調周波数がレーザの共振周期に対応するようにレーザの光路長を調節することによって、波長 $\lambda_c$ 、周波数 $f_c$ のクロックパルスを発生することができる。

【0115】図11はクロック再生器の実施形態を示すブロック図である。このクロック再生器は、入力ポート78及び出力ポート80間に設けられる光パス82と、光パス82に光学的に結合される（例えば方向性結合される）光ループ83を含む能動リングレーザ84とを備えている。

【0116】入力ポート78には波長 $\lambda_s$ 、速度 $f_s$ の信号光が供給される。能動リングレーザ84は、光ループ83でレーザ発振が生じるように光ループ83の損失を補償する光増幅器86と、速度（又は周波数） $f_s$ が光ループ83の周回周期の逆数の整数倍になるように光ループ83の光路長を調節する調節器88と、信号光に基きレーザ発振をモードロックするための光変調器（又は非線形光学媒質）90とを含む。能動リングレーザ84はレーザ発振の波長 $\lambda_c$ を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタ92を更に含んでも良い。

【0117】この構成によると、能動リングレーザ84のレーザ発振がモードロックされる結果、波長 $\lambda_c$ 、周

波数 $f_s$ のクロックパルスが発生し、そのクロックパルスが出力ポート80から出力される。従って、光/電気変換を行なうことなしにクロックパルスを得ることができ、信号光の速度やパルス形状等に依存しない全光クロック再生器の提供が可能になる。

【0118】光変調器90としては、 $\text{LiNbO}_3$ 強度変調器やEA（電界吸収）型変調器等の電気/光変調器を用いることができるほか、二次若しくは三次の非線形光学効果或いは相互利得変調等によるものを用いることができる。例えば、光ファイバ内の四光波混合を用いる場合であれば、信号光の波長 $\lambda_s$ をファイバの零分散波長付近の波長に設定して連続発振光に効果的にAM変調をかけ、これによりクロックパルスが発生可能である。一方、半導体光アンプ（SOA）を用いる場合には、信号光をポンプ光として用いることができる。更に、発振状態のDFB-LD内の四光波混合を用いる場合には、信号光の波長をDFB-LDの発振光とは異なる波長に設定し、この信号光を比較的高いパワーで入力することにより利得飽和を起し、これにより四光波混合の効率に変調をかけると共に、相互利得変調（XGM）効果により連続発振光に有効にAM変調をかけることができる。XGMについては、SOA内の四光波混合を用いる場合にも発生するので、これを積極的に用いても良い。

【0119】また、2次の非線形光学効果の場合にも、信号光をポンプ光として用いれば、ほぼ同じ効果を得ることができる。一方、相互位相変調（XPM）を用いる場合には、例えば位相変調による偏波状態の変動を用いてAM変調を発生させることができる。

【0120】図10に示される本発明による装置は、図9に示される波形整形装置56と同様に、伝送路の途中に設けられる全光2R再生中継器若しくは3R再生中継器として、或いは受信側に置いて受信感度を高めるために使用することができる。いずれにしても、中継光アンプ或いは光ブリアンプと組み合わせることによって、高品質な伝送が可能になる。また、光ファイバ伝送路の分散や非線形光学効果により波形が歪む場合には分散補償器や非線形補償器（例えば位相共役器）を用いて波形を補償した後に、本発明に従って波形整形或いは雑音除去を行うことが有効である。

【0121】以上説明した実施形態では、複数のNOLM

Mをカスケード接続しているが、NOLMと同様の動作原理に基づく複数の干渉計をカスケード接続してもよい。

【0122】干渉計の例としては、SOA-MZI、SOA-MI等がある。

【0123】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、波長変換の自由度が大きい波形整形のための装置の提供が可能になるという効果が生じる。また、本発明によると、そのような装置を備えた新規なシステムの提供が可能になるという効果もある。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は本発明に適用可能なNOLM（非線形光ループミラー）の構成を示す図である。

【図2】図2は位相差 $\Delta\phi$ に対するNOLMの出力特性を示すグラフである。

【図3】図3はNOLMにおける位相整合の説明図である。

【図4】図4は本発明による装置の第1実施形態を示す図である。

【図5】図5の（A）及び図5の（B）は本発明による装置における波長変換の例を示す図である。

【図6】図6は多段接続されたNOLMの特性関数を示すグラフである。

【図7】図7は本発明による装置の第2実施形態を示す図である。

【図8】図8は本発明による装置の第3実施形態を示す図である。

【図9】図9は本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図である。

【図10】図10は本発明による装置の第4実施形態を示すブロック図である。

【図11】図11はクロック再生器の実施形態を示すブロック図である。

【符号の説明】

2 第1の光路

4 第2の光路

6 第1の光カプラ

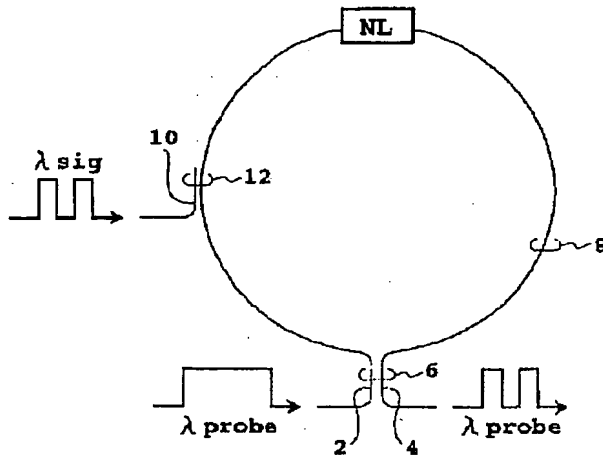
8 ループ光路

10 第3の光路

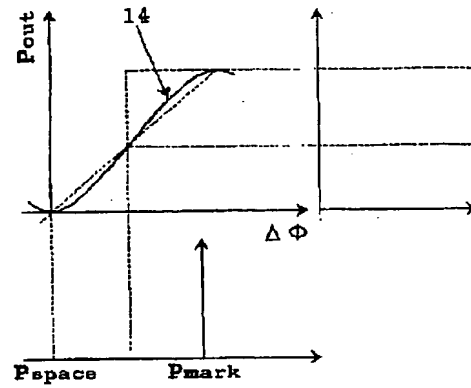
12 第2の光カプラ

【図1】

本発明に適用可能なNOLMの構成を示す図



【図2】

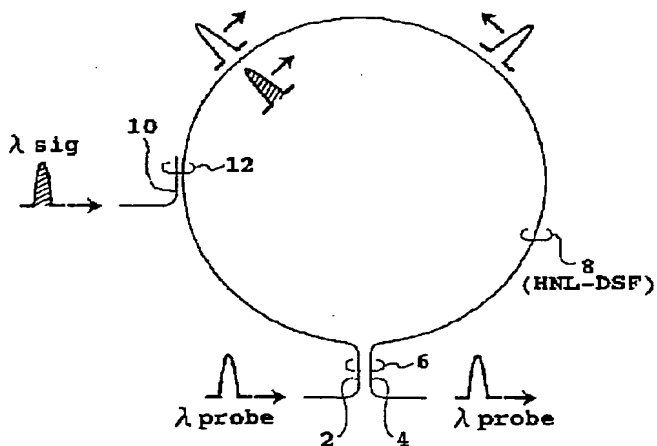
位相差 $\Delta\phi$ に対するNOLMの出力特性を示すグラフ

【図5】

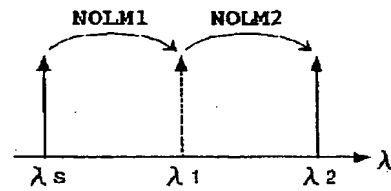
波長変換の例を示す図

【図3】

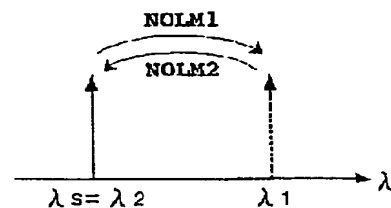
NOLMにおける位相整合の説明図



(A)



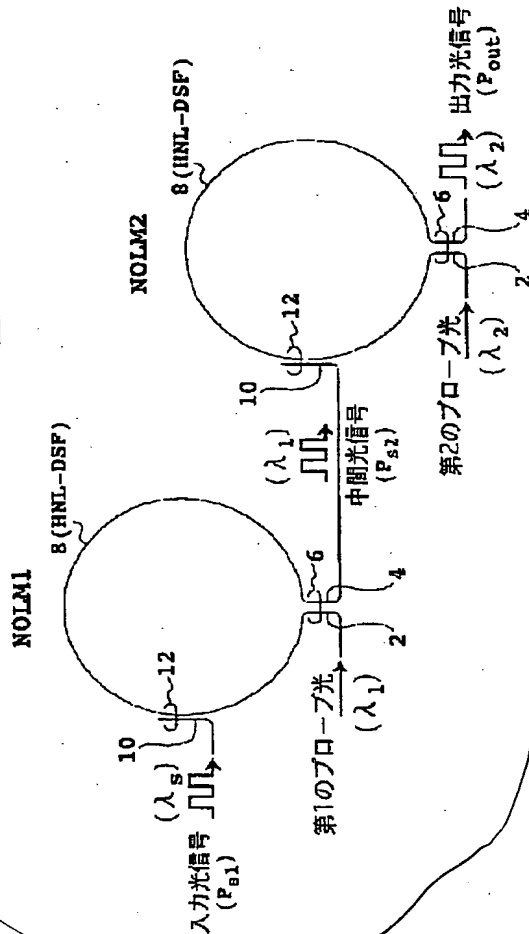
(B)





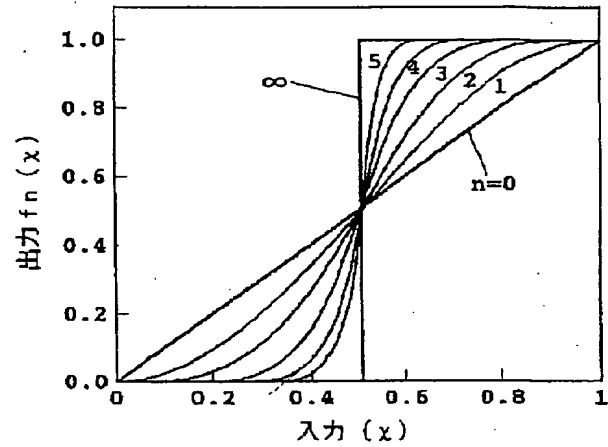
【図4】

本発明による装置の第1実施形態を示す図



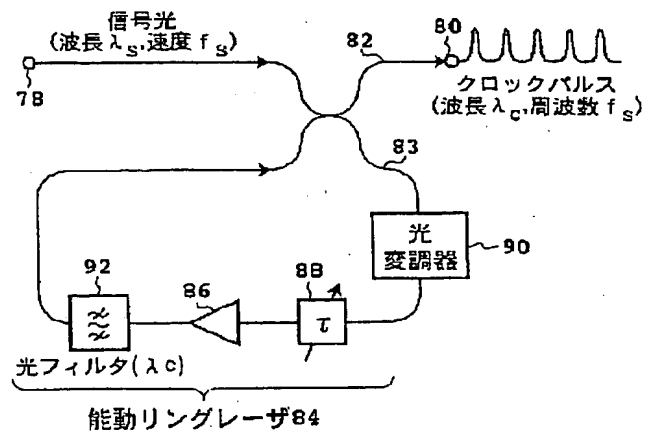
【図6】

多段接続されたNOLMの特性関数を示すグラフ



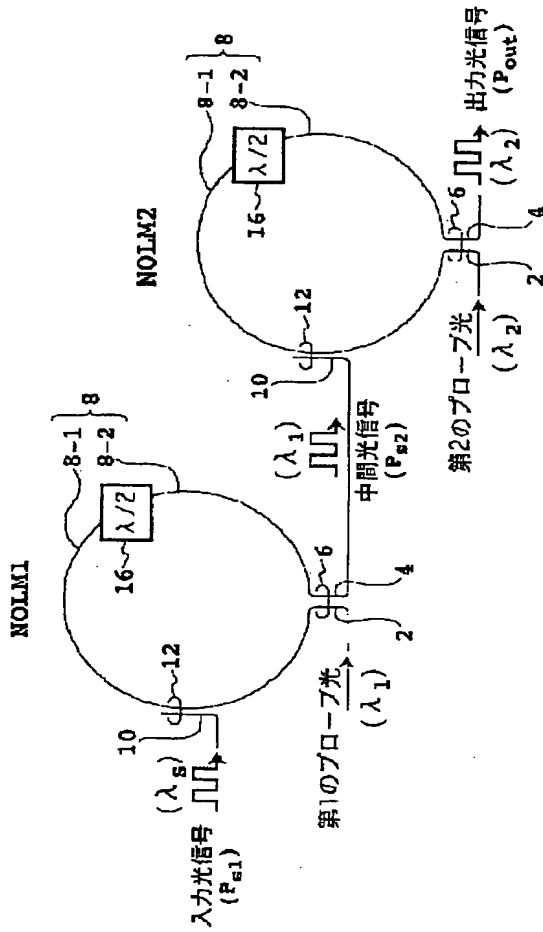
【図11】

クロック再生器の実施形態を示すブロック図



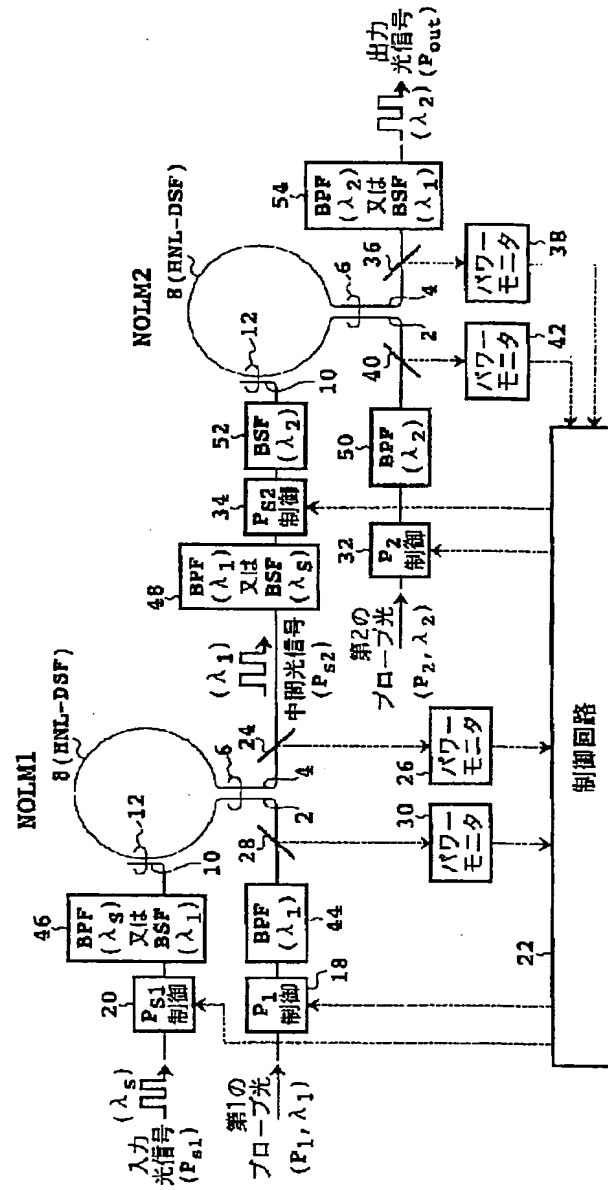
【図7】

本発明による装置の第2実施形態を示す図



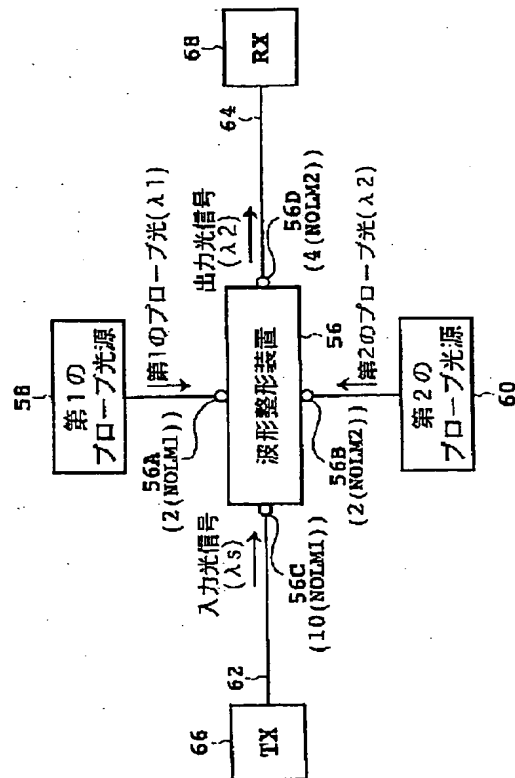
【図8】

本発明による装置の第3実施形態を示す図



【図9】

本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図



【図10】

本発明による装置の第4実施形態を示すブロック図

